

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу **Ликерова Родиона Фаридовича** «Релаксационные и магнитные свойства 3d- и 4f- ионов в монокристаллах ортосиликатов $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$ по данным ЭПР», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

В настоящее время в мире наблюдается большой интерес к различным проблемам квантовой информатики, включая квантовые вычисления и квантовую память. В зависимости от реализации устройства для квантовых вычислений, необходима подходящая квантовая память, а следовательно, и материалы, на которых эта память будет реализована. Диэлектрические кристаллы с примесными ионами с ненулевыми ядерными спинами рассматриваются научным сообществом как кандидаты для реализации квантовой памяти.

Диссертационная работа Ликерова Р. Ф. посвящена исследованию диэлектрических монокристаллов ортосиликатов $Y_2^{28}SiO_5$ и $Sc_2^{28}SiO_5$, допированных редкоземельными ионами неодима $^{143}Nd^{3+}$, иттербия $^{171}Yb^{3+}$, а также ионами металлов переходной группы, такими как хром $^{53}Cr^{3+}$ и ванадий $^{51}V^{4+}$ методами стационарного и импульсного электронного парамагнитного резонанса. Для оценки применимости данных материалов при создании квантовой памяти необходимо исследовать магнитные свойства парамагнитных центров, образованных примесными ионами, оценить релаксационные характеристики этих центров, так как способность к хранению и воспроизведению квантовых кубитов напрямую зависит от времени жизни когерентности спиновых состояний и времени спин-решеточной релаксации.

Поэтому исследование, проведенное в диссертационной работе Ликерова Р. Ф. и направленное на оценку параметров парамагнитных центров в контексте их применимости для создания квантовой памяти является **необходимым и актуальным**.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 основных глав и заключения. Общий объем диссертации равен 122 страницам, в том числе 39 рисунков, 14 таблиц. Количество цитированных источников равно 107. В конце каждой главы приведены выводы по данной главе, в конце диссертации приведено общее заключение с выводами по всей работе.

Во введении диссертации приведены актуальность и новизна исследования, поставлена цель и определены задачи, выполненные в рамках исследования. Также указаны теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, и апробация работы с указанием количества статей, опубликованных по теме диссертации.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор, посвященный проведенным ранее исследованиям ортосиликатов Y_2SiO_5 и Sc_2SiO_5 с примесями таких ионов, как Er^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} , а также Cr^{3+} и V^{4+} . Уделено внимание исследованиям данных материалов оптическими методами и с помощью электронного парамагнитного резонанса.

Во второй главе описываются применяемые экспериментальные методы, а также приведена характеристика объектов исследования. В главе приведено описание кристаллических структур ортосиликатов иттрия и скандия, описан метод синтеза. Отмечено, что в монокристаллах имеется две кристаллографические позиции для ионов иттрия и скандия, причем каждая из кристаллографических позиций в обоих кристаллах при замещении исходных ионов примесными ионами, образует два магнитно – неэквивалентных парамагнитных центра. Приведена система координат, в которой были

описаны экспериментальные результаты. Приведена общая информация о методике ЭПР исследования.

Третья глава диссертации посвящена исследованиям методами стационарного и импульсного ЭПР монокристаллов ортосиликатов иттрия с природным содержанием кремния и обогащенным ^{28}Si , имеющий нулевой ядерный спин, допированных 4f ионами неодима и иттербия.

Было исследовано два монокристалла с различной степенью обогащения кремнием допированных неодимом и монокристалл обогащенный ^{28}Si допированный иттербием.

Ликеровым Р.Ф. изучалось влияние изотопного состава кремния в монокристаллах на релаксационные характеристики примесных ионов неодима. Показано, что время фазовой релаксации и спин-решеточной релаксации для образца с моноизотопным содержанием кремния больше, эта тенденция нарастает при уменьшении температуры.

Впервые установлено, что в сильных полях времена релаксации длиннее, чем для «низкополевых» компонент сверхтонкой структуры.

Показано, что при допировании неодимом, только одна из кристаллографических позиций иттрия оказывается замещенной ионами неодима, в то же время иттербий может занимать две позиции, как с шестикратным, так и семикратным окружением кислорода. Причем время спин-решеточной релаксации семикратным кислородным окружением примерно на порядок превышает это же время в позиции с шестикратным кислородным окружением.

Показано, что основной вклад в разрушение фазовой когерентности электронных спиновых состояний дает спектральная диффузия, что продемонстрировано применением последовательности Карра – Парселла – Мейбума – Гилла, приводящая к увеличению времени T_2 в семь раз.

Следует также отметить, что впервые были получены параметры кристаллического поля примесных центров ионов неодима на основе анализа экспериментальных данных по расположению штарковских уровней и g-тензора, определяющие схему энергетических уровней спиновой системы.

В четвертой главе приведены результаты исследования монокристаллов ортосиликатов иттрия и скандия, допированных 3d ионом $^{53}\text{Cr}^{3+}$. Исследованы три образца, ортосиликат иттрия с различным содержанием примесей и ортосиликат скандия.

Для ортосиликатов иттрия и скандия получены ориентационные зависимости резонансных значений магнитного поля и определены магнитные характеристики парамагнитных центров, образованных ионами хрома.

Показано, что спин-решеточная релаксация и фазовая релаксация в $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ не зависят от концентрации примесных ионов $^{53}\text{Cr}^{3+}$, в случае если концентрация примеси не превышает сотой доли процентов. Установлено, что при 10К времена спин-решеточной релаксации на три порядка превышают аналогичное время для ионов группы редкой земли. *Впервые* для $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ допированных ионами $^{53}\text{Cr}^{3+}$, показано, что скорость фазовой релаксации при использовании метода Карра – Парселла – Мейбума – Гилла возрастает в два раза в температурном диапазоне от 5 до 30К.

В пятой главе исследован монокристалл ортосиликатов скандия, допированных 3d ионом ванадия.

Для этого соединения так же получены ориентационные зависимости резонансных значений магнитного поля и определены магнитные характеристики парамагнитных центров, образованных ионами хрома.

Показано, что время фазовой релаксации в температурном диапазоне от 10К превышает в 50 раз аналогичное время для ионов редкой земли. Доказано, что примесные

ионы ванадия имеют заряд 4+. Из описания температурной зависимости спин-решеточной релаксации определено расстояние между основным и возбужденным уровнями.

Таким образом, в диссертационной работе проведены комплексные исследования ортосиликатов иттрия и скандия с примесью редкоземельных элементов и переходных металлов. Был получен вывод, который являлся целью диссертационной работы, а именно, оценить применимость данных материалов в создании устройств квантовой памяти.

Вывод звучит так: в случае работы при температурах кипения жидкого гелия, редкоземельные ионы демонстрируют более длительные времена спин-решеточной релаксации по сравнению с ионами переходных металлов, при этом время фазовой релаксации находится приблизительно в одной области. При температуре выше 10 К, целесообразнее использовать материалы на основе ортосиликатов с примесями ионов переходных металлов. Кроме этого, 3d ионы хрома Cr^{3+} являются более предпочтительным выбором для приложений квантовой памяти, нежели ионы ванадия V^{4+} .

Диссертационная работа представляет собой законченный научный труд, содержащий существенные новые результаты, которые сформулированы в **Заключении** к диссертации.

Вместе с тем, работа не лишена некоторых недостатков. Имеются следующие замечания и вопросы к диссертационной работе.

1. В главе 2 «Методика и объекты исследования» мало уделено внимания, учитывая, что это экспериментальная работа, методике и технике эксперимента, всего три страницы и отсутствие иллюстрированного материала. Нет описания спектрометров ЭПР, криогенной системы.
2. В главе 2 «Методика и объекты исследования» приводятся описания двух методов измерения скорости спин-решеточной релаксации. Первый - трех импульсный метод стимулированного эха и второй - двух импульсный основанный на наблюдении спада сигнала свободной прецессии. Второй метод, однако, не используется в работе для определения времени T_1 . С другой стороны, два других метода насыщения спинового эха и метод инверсии восстановления, применяемые в работе, в данной главе не описаны.
3. В параграфе 3.2.2 написано, что результаты обрабатывались методом насыщения и методом стимулированного эха. Чем обусловлено выбор метода стимулированного эха, а не метод инверсии восстановления, применяемый для других составов?
4. В параграфе 3.2.2 также сказано, что параметры CD, CR и CO получены методом наименьших квадратов, а значения параметра Δ в результате усреднения модельных кривых. Поясните, что имелось в виду под термином «усреднения модельных кривых» при определении параметра Δ . Для четырех наборов данных приведено одно значение Δ , однако из рисунка 3.3 видно, что данные немного отличаются.
5. В параграфе 5.2.1 приводятся данные температурной зависимости времени спин-решеточной релаксации. Методом подгонки определяются 4 параметра, имея всего 5 экспериментальных точек. Какая результирующая погрешность определения данных параметров и устойчивость решения?
6. В пятой главе делается очень важный и интересный вывод, что 3d ионы хрома Cr^{3+} являются более предпочтительным выбором для приложений квантовой памяти, нежели ионы ванадия V^{4+} . Данный вывод был сделан на основе экспериментальных данных в соединениях $\text{Sc}_2^{28}\text{SiO}_5$ допированный ванадием и $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ допированный хромом. Данные соединения отличаются не только типом допированного иона (хром, ванадий), но также ионом в исходной матрице (иттрий, скандий).

Проводились ли релаксационные измерения для соединения $\text{Sc}_2^{28}\text{SiO}_5$ допированных хромом?

7. В оглавлении пропущено название третьей главы.

Несмотря на возникшие вопросы и замечания к работе, диссертация Ликерова Р. Ф. обладает **актуальностью**, при этом результаты, представленные в диссертации, однозначно обладают **новизной** и также являются **достоверными**. **Теоретическая и практическая значимость** полученных результатов не вызывает сомнений.

Диссертационная работа «Релаксационные и магнитные свойства 3d- и 4f- ионов в монокристаллах ортосиликатов $\text{Y}_2^{28}\text{SiO}_5$ и $\text{Sc}_2^{28}\text{SiO}_5$ по данным ЭПР» **удовлетворяет требованиям** п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, соответствует паспорту специальности 1.3.12. - Физика магнитных явлений, а сам соискатель Ликеров Родион Фаридович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Герашенко Александр Павлович

04.03.2024
дата

подп.

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории кинетических явлений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Контактная информация:

телефон: +7(343) 374-02-30, электронная почта: gerashenko@mail.ru

Адрес: Россия, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики металлов им. М. Н. Михеева

Уральского отделения Российской академии наук

Подпись ведущего научного сотрудника лаборатории кинетических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук Герашенко А. П. заверяю:

И.о. члена секрета



РАМ - В.А. А.М. Довалева

